

基于受激布里渊散射的 200 ps 激光脉冲放大的理论研究

远 航¹ 王雨雷^{1*} 吕志伟¹ 郑振兴¹ 白振旭¹ 哈斯乌力吉¹ 余 锦²

¹ 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

² 中国科学院光电研究院, 北京 100094

摘要 利用受激布里渊散射(SBS)能量转移的方案可以实现高效的百皮秒激光脉冲放大,这种放大方案可以用于冲击点火中冲击脉冲的获取。通过在液体介质中激发声波场,实现了能量从长脉冲向短脉冲转移的过程。利用一个瞬态条件下 SBS 耦合波方程来对 200 ps 脉冲的放大过程进行理论模拟。结果发现,利用 SBS 能量转移的方案可以将 200 ps 的激光脉冲放大到较高的功率密度,同时这个放大过程也伴随着一定程度的脉宽压缩。

关键词 激光器; 受激布里渊散射; 脉冲放大; 瞬态理论; 高功率

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0914003

Theoretical Investigation on 200 ps Laser Pulses Amplification Based on Stimulated Brillouin Scattering

Yuan Hang¹ Wang Yulei¹ Lü Zhiwei¹ Zheng Zhenxing¹ Bai Zhenxu¹ Hasi Wuliji¹ Yu Jin²

¹ National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract High efficient hundred-picosecond laser pulses amplification can be realized by scheme of stimulated Brillouin scattering (SBS) energy transfer. The amplification scheme can be used in the acquisition of shock pulse in shock-ignition. By exciting acoustic field in the liquid media, the process of energy transferring from long pulse to short pulse is realized. A SBS coupled wave equation under the transient condition is used to simulate the amplification process of 200 ps pulse in theory. The results show that SBS energy transfer scheme can amplify 200 ps laser pulse to a higher power density, and the amplification process accompanies with a certain pulse width compression.

Key words lasers; stimulated Brillouin scattering; pulse amplification; transient theory; high power

OCIS codes 140.3280; 190.2640; 140.3430

1 引 言

为实现惯性约束核聚变(ICF),研究者陆续提出了多种点火方式,其中 2007 年 Betti 等^[1]提出的冲击点火方案可以获得较高的中子效率。冲击点火方案将激光脉冲分为两部分,即压缩部分和冲击部分,而如何获得所需的高峰值功率激光脉冲则是该方案的关键问题^[2-3]。

冲击点火方案中冲击脉冲的强度需要达到 $10\sim 20\text{ GW/cm}^2$,传统的激光放大技术,如啁啾脉冲放大技

收稿日期: 2016-02-24; 收到修改稿日期: 2016-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61378007,61378016,61138005)

作者简介: 远 航(1990—),男,博士研究生,主要从事非线性光学及脉冲放大技术等方面的研究。

E-mail: yh6082110401@126.com

导师简介: 吕志伟(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高功率激光与非线性光学技术等方面的研究。

E-mail: zw_lu@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: wyl@hit.edu.cn

术(CPA)和光参量啁啾放大技术(OPCPA)^[4-5]因其较低的光损伤阈值而难以在高功率条件下应用,同时大尺度光栅的制备难度也很高。因此,可用于冲击点火的新型激光放大技术已成为 ICF 领域的研究热点。

受激布里渊散射(SBS)是一种非线性光学效应,介质中抽运光与斯托克斯光相互作用激起的声波场对抽运光的散射会使能量由抽运光向斯托克斯光转移,这为 200 ps 高功率短脉冲激光的获取提供了一种新思路^[6-11]。本文通过瞬态理论研究了 200 ps 激光脉冲的 SBS 放大。与传统激光放大技术相同,激光脉冲的放大率和波形变化仍然是本文关注的主要问题。

2 基本原理

SBS 理论中,使用麦克斯韦方程组描述抽运光场和斯托克斯光场,两个光场通过声波场 ρ 耦合,声波场遵从 Navier-Stokes 方程。用于描述 SBS 过程的耦合波方程如下:

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} = \frac{i\omega_L \gamma_e}{2nc\rho_0} \rho E_S - \frac{\alpha}{2} E_L, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = \frac{i\omega_S \gamma_e}{2nc\rho_0} \rho^* E_L - \frac{\alpha}{2} E_S, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - (2i\Omega_B - \Gamma_B) \frac{\partial \rho}{\partial t} - (i\Omega_B \Gamma_B) \rho = \frac{\gamma_e}{4\pi} q_B^2 E_L E_S^*, \quad (3)$$

式中, E_L 与 E_S 分别为抽运光与斯托克斯光的振幅, ω_L 与 ω_S 为其对应的角频率; ρ 为介质中密度振幅, q_B 为声波场的波矢; n 是介质折射率, c 是光速, γ_e 是电致伸缩常数, ρ_0 为介质平衡状态下的密度, Γ_B 为布里渊线宽, α 为介质吸收系数, i 为虚数单位。

在频域下求解方程(3)式,介质中的声波场可以表示为^[12]

$$\tilde{\rho}(z, \Omega) = -\frac{\gamma_e q_B^2}{4\pi\Omega_B} \tilde{f}(\Omega) \cdot \tilde{F}(E_L E_S^*), \quad (4)$$

式中

$$\tilde{f}(\Omega) = \frac{\Omega_B}{(\Omega - \Omega_B)^2 - \Omega_B^2 - i\Gamma_B(\Omega - \Omega_B)}, \quad (5)$$

布里渊线宽 $\Gamma_B = \frac{1}{\tau_B}$ 为介质声子寿命的倒数,主要反映布里渊放大过程中声波场的弛豫时间; $\Omega_B = \omega_L - \omega_S$, 为抽运光与斯托克斯光之间的频移。

对方程(4)进行傅里叶逆变换,可以得到:

$$\rho(z, t) = -\frac{\gamma_e q_B^2}{4\pi\Omega_B} f(t) \otimes (E_L E_S^*), \quad (6)$$

式中 \otimes 为卷积运算,展开即

$$\rho(z, t) = \frac{\gamma_e q_B^2}{4\pi\Omega_B} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t f(t - \tau) E_L(z, \tau) E_S^*(z, \tau) d\tau. \quad (7)$$

稳态时 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 则:

$$\rho(z) = -\frac{\gamma_e q_B^2}{4\pi\Omega_B} E_L E_S^* \left(-\frac{i}{\Gamma_B} \right). \quad (8)$$

用 $v(z, t)$ 代替原来的 $\rho(z, t)$, 可在方程中省略部分系数,由以上计算可以将耦合波方程改写为

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} E_L = -igv E_S, \quad (9)$$

$$-\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} E_S = -igv^* E_L, \quad (10)$$

$$v(z, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t f(t - \tau) E_L(z, \tau) E_S^*(z, \tau) d\tau, \quad (11)$$

式中 $g = \frac{\gamma_s^2 \omega^2}{2nc^3 \nu \rho_0}$ 为布里渊增益系数, 主要反映 SBS 过程中光波场与声波场的耦合强度。

首先对(11)式进行离散化处理, 方程可变换为

$$\nu = \frac{-\Omega_B}{2i\sqrt{\Omega_B^2 - \frac{\Gamma_B^2}{4}}} \left\{ \int_{-\infty}^t \exp[b_1(t-\tau)] E_L(z, \tau) E_S^*(z, \tau) d\tau - \int_{-\infty}^t \exp[b_2(t-\tau)] E_L(z, \tau) E_S^*(z, \tau) d\tau \right\}, \quad (12)$$

式中 $b_1 = i\Omega_B - \frac{\Gamma_B}{2} + i\sqrt{\Omega_B^2 - \frac{\Gamma_B^2}{4}}$, $b_2 = i\Omega_B - \frac{\Gamma_B}{2} - i\sqrt{\Omega_B^2 - \frac{\Gamma_B^2}{4}}$ 。

将(12)式代入(9)式与(10)式, 并对振幅 E_S 与 E_L 进行差分处理, 就可以得到能够用于数值计算的方程。

最终用于数值模拟的差分方程格式如下:

$$\frac{E_{L_j}^{m+1} - E_{L_j}^m}{\Delta t} + \frac{1}{2}\alpha E_{L_j}^{m+1} + \frac{c}{n} \frac{E_{L_{j+1}}^{m+1} - E_{L_j}^{m+1}}{\Delta z} = -ig \frac{c}{n} \nu^{m+1} E_{S_j}^{m+1}, \quad (13)$$

$$\frac{E_{S_j}^{m+1} - E_{S_j}^m}{\Delta t} + \frac{1}{2}\alpha E_{S_j}^{m+1} + \frac{c}{n} \frac{E_{S_{j+1}}^{m+1} - E_{S_j}^{m+1}}{\Delta z} = -ig \frac{c}{n} \nu^{m+1} E_{L_j}^{m+1}. \quad (14)$$

基于以上瞬态理论, 接下来对高功率注入条件下的布里渊放大进行研究。

3 结果和讨论

利用 Fortran 语言对百皮秒脉冲的 SBS 放大过程进行数值模拟, 首先设定数值模拟的初始条件。注入斯托克斯种子脉宽为 200 ps, 抽运脉冲为宽度为 5 ns 的 8 阶超高斯脉冲(图 1), 斯托克斯脉冲和抽运脉冲具有相同的强度。初始模拟选用的布里渊增益介质为 FC-40, 其化学结构由 $(C_4F_9)_3N$ 和 $(C_4F_9)_2NCF_3$ 构成, 介质的折射率为 1.29, 声速为 444 m/s, 增益系数为 1.8 cm/GW, 声子寿命为 0.3 ns(1064 nm), 布里渊频移为 1550 MHz。在布里渊放大过程中, 抽运光和斯托克斯光在介质内对向传输, 其相互作用长度通过公式 $L = (T_p - T_s)c / (2n)$ 计算得到 T_p 为抽运光的脉宽, T_s 为斯托克斯光的脉宽。结果为 60 cm。

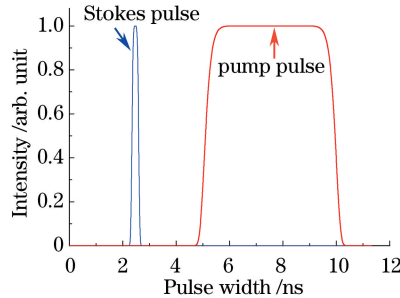


图 1 斯托克斯脉冲和抽运脉冲

Fig. 1 Stokes pulse and pump pulse

另外, 为了定量描述布里渊放大过程中的能量转移情况, 定义能量抽取效率 $\eta = (E_{S_{out}} - E_{S_{in}}) / E_p$, 式中 $E_{S_{out}}$ 为输出斯托克斯脉冲能量, $E_{S_{in}}$ 为注入斯托克斯脉冲能量, E_p 为抽运能量。高功率 200 ps 脉冲的获取要求较高的能量抽取效率, 即大部分抽运能量可以转移到斯托克斯脉冲中。

根据过去的实验研究成果, 介质参数对布里渊放大过程有很大的影响, 其中介质声子寿命和布里渊增益系数是两个最重要的参数。首先, 就声子寿命对布里渊放大的影响进行了研究。在数值模拟中, 取注入斯托克斯光强和抽运光强为 500 MW/cm^2 , 增益系数为 1.8 cm/GW。放大后的斯托克斯脉冲宽度和能量抽取效率随声子寿命的变化分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可见, 随着声子寿命的增加, 放大后的斯托克斯脉冲宽度变宽, 并在最后趋于稳定; 这是因为介质的声子寿命反映了介质中声波场的弛豫时间, 当声子寿命增加时, 斯托克斯脉冲前沿和后沿在声波场的影响下都会得到放大, 从而造成脉冲的展宽。所以在 SBS 过程中, 选取声子寿命较短的介质有利于短脉冲的获

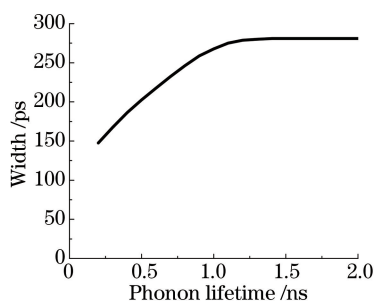


图 2 放大后的斯托克斯脉冲宽度随声子寿命的变化

Fig. 2 Amplified Stokes pulse width varies with phonon lifetime

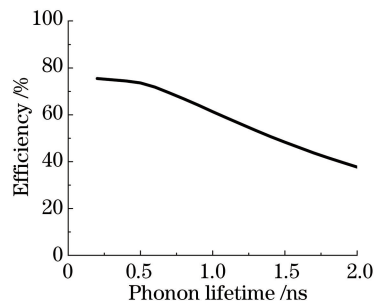


图 3 能量抽取效率随声子寿命的变化

Fig. 3 Energy extraction efficiency varies with phonon lifetime

取。从图 3 可见,能量抽取效率随声子寿命的增加而减小,这是因为较长的声子寿命会使瞬态增益下降。

继续研究了增益系数对布里渊放大过程的影响。数值模拟中,取抽运光强和斯托克斯光强为 500 MW/cm^2 , 声子寿命为 0.2 ns 。放大后的斯托克斯脉冲宽度和能量抽取效率随增益系数的变化分别如图 4 和图 5 所示。

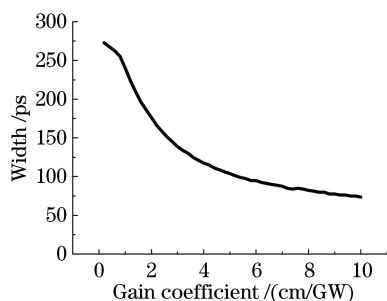


图 4 放大后的斯托克斯脉冲宽度随增益系数的变化

Fig. 4 Amplified Stokes pulse width varies with gain coefficient

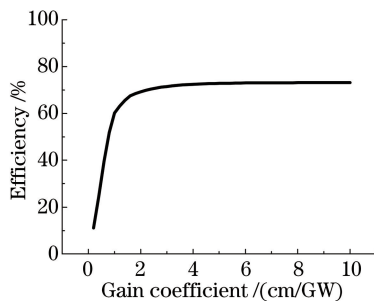


图 5 能量抽取效率随增益系数的变化

Fig. 5 Energy extraction efficiency varies with gain coefficient

从图 4 和图 5 可见,随着布里渊增益系数的增加,放大后的斯托克斯脉冲宽度变窄,能量抽取效率增加,这是因为当增益系数增加时,斯托克斯脉冲能更有效地抽取抽运脉冲的能量。相对于脉冲后沿,脉冲前沿得到更加充分的放大,这使脉冲形成陡前沿的结构,脉宽减小。另外,由于斯托克斯脉冲能量的增长受到确定的抽运能量的限制,当增益系数达到一定值后,斯托克斯脉冲宽度和能量抽取效率会逐渐趋于稳定。

最后对布里渊放大过程中非线性吸收的影响进行了数值模拟。当抽运光强较高时,布里渊介质中会出现非线性吸收,这会影响能量放大率和输出斯托克斯光强。

SBS 介质中的非线性吸收效应对脉冲放大过程的影响如图 6 所示,在注入抽运强度为 300 MW/cm^2 处,输出斯托克斯脉冲功率放大率达到峰值,之后开始下降,这是由于当抽运强度继续增大时,非线性吸收效应限制了功率放大率的进一步增加。因此为了得到较高的斯托克斯光强输出,应选用非线性吸收系数较低的介质。

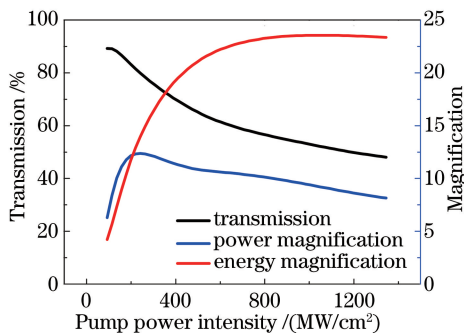


图 6 非线性吸收对布里渊放大过程的影响

Fig. 6 Influence of nonlinear absorption on Brillouin amplification

4 结 论

通过瞬态理论研究了布里渊放大过程,并使用 Fortran 语言对其进行了数值模拟。通过改变数值模拟的参数,对能量抽取效率和脉冲压缩进行了分析。分析结果表明,具有较短声子寿命和较高布里渊增益系数的介质有利于实现高功率布里渊放大,且在没有发生脉冲展宽的前提下,能量抽取效率可以达到 60% 以上。上述研究内容为后期的大能量 SBS 百皮秒脉冲放大和压缩实验研究提供了理论参考。

参 考 文 献

- 1 Betti R, Zhou C D, Anderson K S, *et al.* Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density[J]. Physical Review Letters, 2007, 98: 155001.
- 2 Ribeyre X, Schurtz G, Lafon M, *et al.* Shock ignition: an alternative scheme for HiPER[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2009, 51(51): 015013.
- 3 Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, *et al.* Research status of conceptual designs of diode-pumped solid-state laser driver for HiPER[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080005.
肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 欧洲 HiPER 项目激光驱动器概念设计研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080005.
- 4 Moses J, Manzoni C, Huang S W, *et al.* Temporal optimization of ultrabroadband high-energy OPCPA[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5540-5555.
- 5 Tian Xiaocheng, Zhang Kun, Zhu Na, *et al.* Research on linear chirped pulse generated by direct phase modulation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0302002.
田小程, 张 崑, 朱 娜, 等. 直接相位调制产生线性啁啾脉冲特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302002.
- 6 Bai Zhenxu, Wang Yulei, Lü Zhiwei, *et al.* Research progress of serial laser beam combination based on stimulated Brillouin amplification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 10004.
白振旭, 王雨雷, 吕志伟, 等. 基于布里渊放大串行激光组束研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 110004.
- 7 Bai Z X, Wang Y L, Lü Z W, *et al.* High compact, high quality single longitudinal mode hundred picoseconds laser based on stimulated Brillouin scattering pulse compression[J]. Applied Sciences, 2016, 6(1): 29.
- 8 Yuan Qiang, Wei Xiaofeng, Zhang Xiaomin, *et al.* Study on stimulated Brillouin scattering energy transfer to amplify laser pulses for shock ignition in laser fusion facilities[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(11): 114207.
袁 强, 魏晓峰, 张小民, 等. 基于受激布里渊散射能量转移的冲击点火激光技术研究[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 114207.
- 9 Yuan Qiang, Wei Xiaofeng, Zhang Xiaomin, *et al.* Conceptual research on modifications of indirect drive laser facilities for shock ignition[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(11): 114206.
袁 强, 魏晓峰, 张小民, 等. 基于现役装置的冲击点火可行性概念研究[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 114206.
- 10 Hasi W, Lü Z W, He W M, *et al.* Experimental investigation on the improvement of SBS characteristics by purifying the mediums[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(12): 718-721.
- 11 Lu Z, Gao W, He W, *et al.* High amplification and low noise achieved by a double-stage non-collinear Brillouin amplifier [J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10675-10680.
- 12 Velchev I, Neshev D, Hogervorst W, *et al.* Pulse compression to the subphonon lifetime region by half-cycle gain in transient stimulated Brillouin scattering[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(12): 1812-1816.